

## **Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа**

**М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, А. С. Якушенко, Т. П. Маслак**

Национальный авиационный университет, Киев, Украина

*Представлены результаты исследования, направленного на создание компьютеризованного оптического метода оценки накопленного усталостного повреждения. Показана возможность прогнозирования остаточного ресурса элементов авиационных конструкций из плакированных алюминиевых сплавов по деформационному рельефу поверхности вблизи концентраторов напряжений. Для количественной оценки деформационного рельефа используются параметры, характеризующие его насыщенность и фрактальную размерность.*

**Ключевые слова:** конструкционные алюминиевые сплавы, усталость, исчерпание ресурса, деформационный рельеф, эволюция фрактальной размерности.

**Введение.** Несмотря на значительные материальные затраты, связанные с проведением натурных испытаний авиационных конструкций, они остаются неотъемлемой составляющей процесса обеспечения прочности и долговечности, позволяя определять слабые места конструкции воздушного судна и его живучесть.

Сокращение продолжительности натурных испытаний может быть достигнуто путем надежной инструментальной диагностики ранних стадий усталостного повреждения судна. Аналогичные методы могут быть использованы также для мониторинга его технического состояния в эксплуатации, что обусловлено существенными различиями условий нагружения и, как следствие, не синхронным исчерпанием ресурса отдельными воздушными судами. Таким образом, разработка неразрушающих методов диагностики элементов авиационных конструкций остается актуальной проблемой.

Существующие в настоящее время методы контроля физико-механических свойств конструкционных материалов не всегда отвечают предъявляемым требованиям. Разнообразие применяемых конструкционных материалов, условий их нагружения, требований к чувствительности методов диагностики приводит к необходимости создания спектра методов и методик определения накопленного повреждения и прогнозирования остаточного ресурса.

Работы, которые проводятся в последнее время в Национальном авиационном университете, основываются на возможности оценки накопленного усталостного повреждения по параметрам структурной повреждаемости поверхности. Такой подход может быть реализован как путем анализа состояния так называемых образцов-свидетелей, сенсоров, которые закрепляются на конструкции в зоне действия значительных усилий, воспринимают эксплуатационный спектр нагрузок, изменяют свои характеристики и таким образом дают информацию о накопленном элементами конструкции усталостном повреждении, так и при непосредственном контроле элементов авиационных конструкций.

В работе [1] предложен монокристаллический сенсор деформационного повреждения, в качестве диагностического параметра в этом случае используется плотность полос скольжения на его поверхности. Такой сенсор представляет собой полированную с одной стороны монокристаллическую пластину размером  $20 \times 10 \times 0,2$  мм, которая клеем крепится на элемент конструкции. Подсчет количества полос скольжения осуществляется с помощью оптического микроскопа. Проведенные исследования указывают на тесную корреляционную связь плотности полос скольжения с числом циклов до разрушения конструктивного элемента и уровнем приложенных нагрузок.

В некоторых случаях нет необходимости крепления монокристаллического сенсора, так как деформационный рельеф, сигнализирующий о деформационном повреждении, формируется непосредственно на поверхности конструкционных материалов. К таким материалам относятся листовые алюминиевые сплавы, плакируемые технически чистым алюминием. В работе [2] предложен количественный параметр повреждения  $D$ , численное значение которого определяется как отношение площади поверхности со следами микропластической деформации к общей площади контролируемой поверхности. При этом исследуется участок поверхности размером  $0,3 \times 0,3$  мм. Расстояние от края концентратора до границы участка контроля составляет  $0,02$  мм и определяется в связи с необходимостью мониторинга деформационного рельефа в зоне действия наибольших напряжений.

Ранее [3–6] представлены методика автоматизированного определения параметра повреждения, характеризующего насыщенность поверхности следами микропластической деформации, его распределение вблизи концентратора напряжений, результаты мониторинга в процессе циклического нагружения, а также возможность прогнозирования остаточного ресурса элементов авиационных конструкций.

Поиск дополнительных критериев оценки деформационного рельефа приводит к применению подходов фрактальной геометрии, которые в последнее время широко используются в задачах материаловедения. Так, в работе [7] представлены примеры использования фрактальной геометрии для описания процесса формирования и развития полос скольжения на поверхности монокристаллов. В [8] с помощью методов фрактальной геометрии изучалась эволюция структурных изменений композита карбид вольфрама–железомарганцевая сталь в результате нагружения сжатием. Исследовался деформационный рельеф поверхности. Установлено, что фрактальная размерность поверхности зависит от среднего расстояния между полосами локализованной деформации и параметров кристаллической структуры. Изменение фрактальной размерности поверхности при деформировании никелида титана исследовалось в работе [9]. Уменьшение фрактальной размерности наблюдалось при отсутствии на РЭМ изображений визуально заметного остаточного деформационного рельефа. Показано, что флуктуации величины фрактальной размерности максимальны во время смены основного механизма деформации.

Анализ результатов исследований деформационных процессов с применением фрактальной геометрии позволяет выделить подходы, совершенствующие методику оптического контроля состояния поверхности при выпол-

нении оценки накопленного усталостного повреждения и прогнозировании остаточного ресурса элементов конструкций из плакированных алюминиевых сплавов.

Целью настоящей работы является обоснование возможности количественной оценки накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа, формирующегося на поверхности плакированных конструкционных алюминиевых сплавов при циклическом нагружении.

**Методика эксперимента.** Исследовалось развитие деформационного рельефа на поверхности плакированного алюминиевого сплава Д16АТ. Образцы нагружались консольным изгибом с частотой 25 Гц при  $\sigma_{\max} = 125,6; 134,3; 147,0; 173,2$  и  $235,0$  МПа. Поверхность подготавливалась как металлографический шлиф механической полировкой алмазными пастами. Геометрия образцов с концентратором напряжений в виде отверстия представлена на рис. 1.

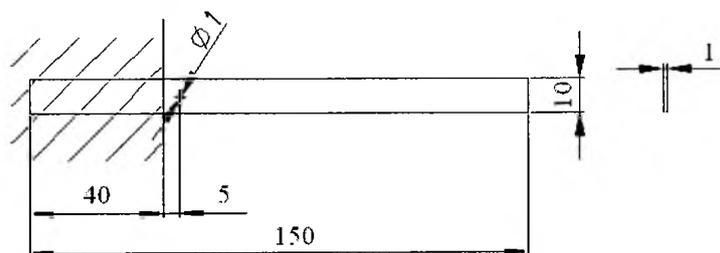


Рис. 1. Образец для усталостных испытаний.

В результате циклического нагружения на поверхности образца формировался и развивался деформационный рельеф, интенсивность которого, как было показано выше, соответствовала уровню приложенных к образцу напряжений, их распределению вблизи концентратора и числу циклов нагружения. Применяемая методика предполагала использование для определения накопленного повреждения цифровых фотографий деформационного рельефа (рис. 2), полученных с помощью оптического микроскопа ММР-4.

Соответствие исследуемых структур известной схеме формирования экструзий и интрузий [10] было доказано проведением электронно-микроскопических исследований образцов алюминиевых сплавов, испытанных в диапазоне максимальных напряжений цикла нагружения  $67,3...150$  МПа ( $23...51\%$  предела текучести). На рис. 3 приведена фотография поверхности образца с развитым деформационным рельефом, полученная с помощью растрового электронного микроскопа SEM-515 фирмы "Phillips" при напряжении 30 кВ.

В работах [3–6] показано, что обработка цифровых фотографий поверхности плакированных алюминиевых сплавов позволяет количественно оценить насыщенность поверхности следами микропластической деформации и соответствующее накопленное усталостное повреждение. Приведенные ниже результаты исследования свидетельствуют, что фрактальная размерность кластеров деформационного рельефа, характеризующая их форму, является

дополнительным параметром, благодаря использованию которого существенно повышается точность определения накопленного усталостного повреждения.

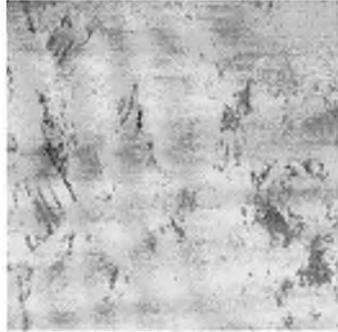


Рис. 2

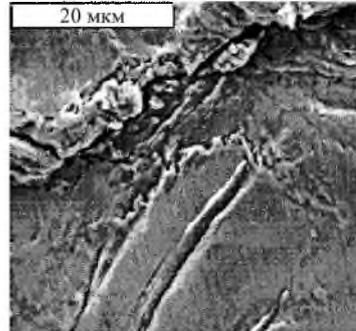


Рис. 3

Рис. 2. Поверхность плакирующего слоя алюминиевого сплава Д16АТ после 31000 цикл, консольный изгиб,  $R = 0$ ,  $\sigma_{\max} = 173,2$  МПа ( $\times 500$ ).

Рис. 3. Поверхность плакирующего слоя алюминиевого сплава Д16АТ после 325800 цикл,  $R = 0$ ,  $\sigma_{\max} = 100$  МПа.

В настоящее время имеется большое количество методик определения фрактальной размерности объектов природного происхождения. Метод “box counting” является одним из наиболее распространенных [7]. Его суть состоит в том, что изображение исследуемых объектов покрывается сеткой с ячейками размером  $b \times b$ . Количество ячеек  $N(b)$ , необходимое для покрытия, зависит от размеров ячеек, площади кластеров и формы их границ. По результатам измерений строится график зависимости количества необходимых для покрытия ячеек от их размера. Угол наклона соответствующей зависимости определяет фрактальную размерность границ кластеров, которая обозначается  $D_p$ .

Для некоторых фракталов информативной является размерность отношения периметра к площади. Известно, что данное отношение является характеристикой формы объекта, для правильных геометрических фигур эта величина постоянная, не зависящая от их размеров. В работе [11] такая размерность характеризовала форму облаков и рек. Соответствующую фрактальную размерность, определенную для кластеров деформационного рельефа, обозначим  $D_{p/s}$ .

Для автоматизации процесса вычисления фрактальных размерностей деформационного рельефа создано специальное программное обеспечение.

Программа для вычисления фрактальной размерности базируется на ранее [4] разработанном программном обеспечении для определения параметра повреждения  $D$ . Основные этапы вычислений:

- преобразование цифрового изображения поверхности в монохромное;
- выделение отдельных кластеров деформационного рельефа;
- определение контуров кластеров деформационного рельефа;
- наложение сетки ячеек на контуры кластеров или на их поверхность;
- подсчет количества ячеек, покрывающих контуры кластеров или их поверхность;

построение графиков зависимостей  $\ln N_p = f(\ln(1/b))$ ,  $\ln N_s = f(\ln(1/b))$  и  $\ln N_p = f(\ln(N_s))$ , где  $N_p$  – количество ячеек, которые покрывают контуры кластеров деформационного рельефа;  $N_s$  – количество ячеек, которые покрывают поверхность кластеров деформационного рельефа;  $b$  – размер стороны ячейки.

Одна из зависимостей  $\ln N_p = f(\ln(N_s))$ , полученная в ходе исследования, представлена на рис. 4. Коэффициент 0,8214 линейной зависимости  $\ln N_p = 0,8214 \ln N_s + 0,4726$  является фрактальной размерностью контуров кластеров. Достаточно большое значение квадрата коэффициента корреляции ( $R^2 = 0,9837$ ) подтверждает фрактальность исследуемых структур.

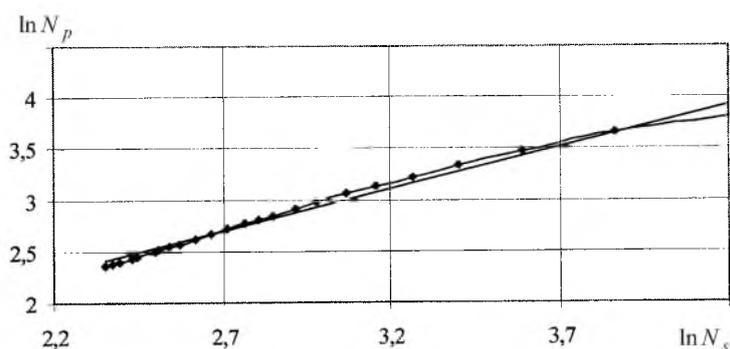


Рис. 4. Связь количества ячеек, покрывающих контуры кластеров деформационного рельефа, с количеством ячеек, покрывающих поверхность кластеров.

Фрактальная размерность  $D_{p/s}$  при использовании геометрического метода определялась как удвоенное значение модуля тангенса угла наклона среднего участка фрактального графика при его линейной аппроксимации, построенного в двойных логарифмических координатах [12].

Фрактальные размерности контуров кластеров деформационного рельефа, как и фрактальная размерность, определяемая по отношению периметра к площади, превышают топологическую размерность линии и находятся в диапазоне 1...2.

**Результаты эксперимента.** Благодаря объему проведенных исследований можно получить кривые усталости, охватывающие значительный диапазон напряжений и долговечностей. Наличие “переломов” на кривых усталости позволяет принять режимы циклического нагружения с учетом различия в механизмах накопления повреждения при малых и больших напряжениях. При этом фиксировались моменты полного разрушения образцов и появления первых полос скольжения (рис. 5).

Конструкция специально изготовленной испытательной машины позволяет выполнять циклические наработки любой продолжительности. Этим она отличается от гидропульсаторов, в которых часть наработки составляют переходные режимы. Таким образом, была обеспечена возможность оптического контроля состояния поверхности компактных образцов (рис. 1) после первых нескольких сотен циклов нагружения. В качестве диагностических параметров рассматривались: повреждение  $D$  и фрактальная размерность  $D_{p/s}$ .

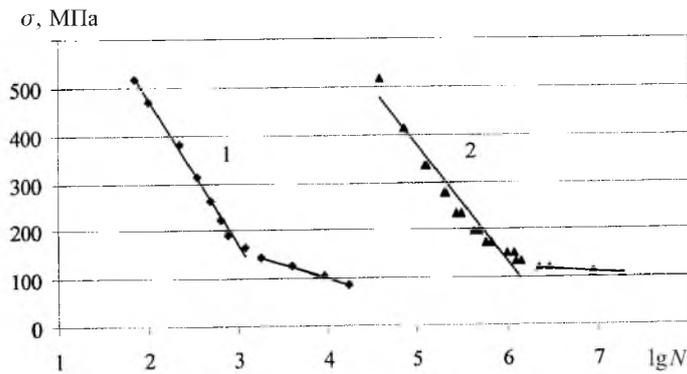


Рис. 5. Кривые усталости, построенные по результатам испытаний при консольном изгибе: 1 – по моменту появления первых полос скольжения; 2 – по моменту полного разрушения образцов.

Рассмотрим эволюцию параметров  $D$  и  $D_{p/s}$ . Испытаниям подвергались шесть образцов, для каждого из них состояние поверхности контролировалось в двух точках. Максимальное напряжение цикла составляло 173,2 МПа (74% предела текучести).

На рис. 6 представлены результаты контроля параметров повреждения  $D$  и фрактальной размерности  $D_{p/s}$  в процессе циклического нагружения, определенных на участках поверхности, находящихся на расстоянии 0,02 мм от края отверстия. По оси абсцисс отложено относительное число циклов нагружения  $N$  – отношение текущего числа циклов к разрушающему.

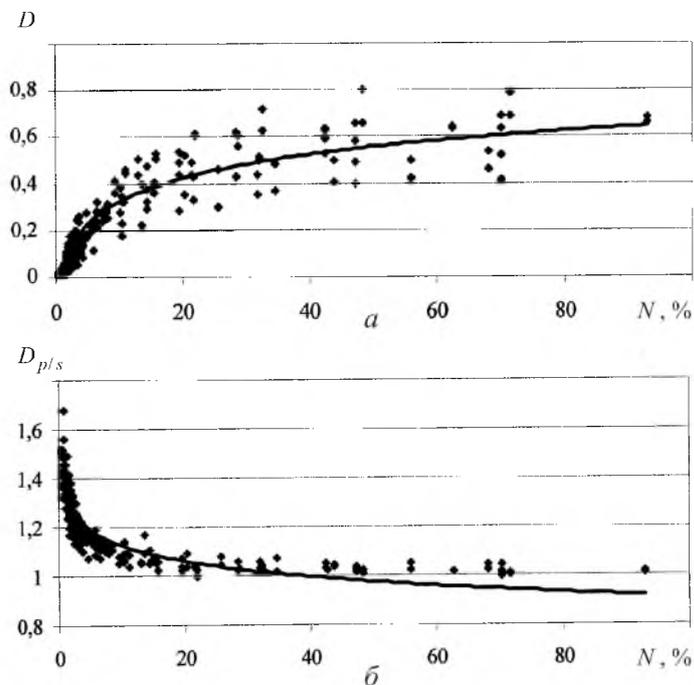


Рис. 6. Эволюция параметров повреждения  $D$  (а) и фрактальной размерности  $D_{p/s}$  (б) в процессе циклического нагружения.

Как видно, оба параметра характеризуют накопленное усталостное повреждение. При этом параметр повреждения  $D$  указывает на изменяющуюся с увеличением числа циклов нагружения насыщенность поверхности экструзиями и интрузиями, формирующими деформационный рельеф, а изменение фрактальной размерности  $D_{p/s}$  характеризует процесс слияния кластеров деформационного рельефа, изменяющий соотношение между периметром контуров кластеров и их площадью.

Практической задачей мониторинга накопленного усталостного повреждения является прогнозирование остаточного ресурса элементов авиационных конструкций. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность применения множественных корреляционных моделей, позволяющих учитывать оба указанных выше параметра, изменяющихся в процессе усталости и характеризующих деформационный рельеф поверхности.

Регрессионный и дисперсионный анализы с помощью модуля “ANOVA” программы “Statgraphics Plus” свидетельствуют о целесообразности применения множественной корреляционной модели:

$$N_{\text{ост}} = 180,346 - 109,588D - 56,6685D_{p/s},$$

где  $D$  – параметр повреждения;  $D_{p/s}$  – фрактальная размерность;  $N_{\text{ост}}$  – остаточное количество циклов нагружения, в %.

Соответствующее значение  $R^2 = 81,4\%$ , стандартная ошибка равна 6,48. Выполненные анализы указывают на значимость обоих параметров.

**Заключение.** Представленные результаты свидетельствуют о возможности определения накопленного усталостного повреждения и прогнозирования остаточного ресурса элементов авиационных конструкций из плакированных алюминиевых сплавов с помощью компьютеризованного оптического метода, основанного на количественной оценке деформационного рельефа.

Для прогнозирования остаточного ресурса элементов конструкций могут использоваться множественные корреляционные модели, включающие параметр повреждения  $D$ , характеризующий насыщенность поверхности следами микропластической деформации, и фрактальную размерность  $D_{p/s}$ , определяемую по отношению периметра к площади кластеров деформационного рельефа.

## Резюме

Представлено результати досліджень, спрямованих на створення комп'ютеризованого оптичного методу оцінки накопиченого втомного пошкодження. Показано можливість прогнозування залишкового ресурсу елементів авіаційних конструкцій з плакованих алюмінієвих сплавів по деформаційному рельєфу поверхні поблизу концентраторів напружень. Для кількісної оцінки деформаційного рельєфу використовуються параметри, які характеризують його насиченість і фрактальну розмірність.

1. Карускевич М. В., Засимчук Е. Э., Радченко А. И. Метод и датчик автономного неразрушающего контроля поврежденности и исчерпания несущей способности деталей и конструкций // Пробл. прочности. – 1990. – № 12. – С. 110 – 114.
2. Декларацийний патент на корисну модель № 3470 “Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару” / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, О. М. Карускевич. – Чинний з 15.11.2004, Бюл. № 11.
3. Карускевич О. М., Ігнатович С. Р., Карускевич М. В., Пантелеєв В. М. Диагностика усталости плакированных алюминиевых сплавов // Вестн. НТУУ “КПИ”. Машиностроение. – 2002. – № 43. – С. 53 – 55.
4. Карускевич О. М., Ігнатович С. Р., Карускевич М. В. та ін. Моніторинг втоми конструкційних алюмінієвих сплавів // Вісн. НАУ. – 2004. – № 1 (19). – С. 88 – 91.
5. Карускевич О. М., Ігнатович С. Р., Карускевич М. В. Эволюция поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2004. – № 4 (12). – С. 29 – 32.
6. Карускевич О. М. Влияние уровня напряжений на развитие деформационного рельефа // Вестн. двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 79 – 83.
7. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
8. Севастьянова И. Н., Кульков С. Н. Фрактальные характеристики поверхности пластически деформированного композита карбид вольфрама-железомарганцевая сталь // Журн. техн. физики. – 2003. – 73, вып. 2. – С. 81 – 86.
9. Кульков С. Н., Миронов Ю. П. Фрактальная размерность поверхности при деформационном мартенситном превращении в никелиде титана // Там же. – 2004. – 74, вып. 4. – С. 129 – 132.
10. Горицкий В. М., Терентьев В. Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
11. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
12. Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas // Science. – 1982. – 216, No. 4542. – P. 185 – 187.

Поступила 11. 07. 2007